

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет»

Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Базовая кафедра фотоники и лазерных технологий

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой:

 Втюрин А.Н.

” 20 ” июль 2018г.

НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (ДИССЕРТАЦИЯ)

Переходные процессы при параметрическом взаимодействии
встречных волн

Специальность

03.06.01 – Физика и астрономия

01.04.05 – Оптика

Научный руководитель  д. ф.-м. н., проф. Слабко В.В.

Аспирант Ткаченко Ткаченко В.А.

Красноярск 2018 г.

Ткаченко Виктор Александрович

АННОТАЦИЯ

**научно-квалификационной работы (диссертации)
«ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВСТРЕЧНЫХ ВОЛН»**

03.06.01 «Физика и астрономия»

01.04.05 «Оптика»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Нелинейная оптика уже долгое время является динамично развивающейся областью физики, которая позволяет решать важные прикладные и инженерные задачи. Исследования нелинейных оптических процессов способствовали развитию лазерной техники, оптоволоконных линий связи, спектроскопии, фотоники и оптоинформатики, а также использованию оптики в таких отраслях как экология и медицина.

Основная задача любого нелинейного параметрического оптического устройства – преобразование частоты. Хотя обычно в оптике рассматривается задача, когда взаимодействующие волны распространяются в среде в одном направлении, взаимодействие волн, распространяющихся на встречу друг другу, как было показано в ряде работ [1-3], позволяет достичь гораздо большей эффективности преобразования. Такое встречное взаимодействие открывает возможность создания без зеркальных параметрических генераторов и миниатюрных параметрических усилителей света [4-6].

Однако, встречное взаимодействие в литературе рассматривается редко, из-за сложностей реализации, связанных с необходимостью согласования фаз противораспространяющихся волн (закон сохранения импульсов волн) [7]. На сегодняшний день существует несколько подходов решения данной проблемы.

Наиболее естественным образом фазовое согласование встречных волн может быть обеспечено благодаря использованию метаматериалов с отрицательным показателем преломления, в которых вектор Пойтнинга волны и её фазовая скорость противоположны друг другу в узкой полосе частот [8]. Оптические метаматериалы в свою очередь открывают широкие возможности, такие как создание суперлинзы с разрешением, превышающим дифракционный предел, и достижение эффекта невидимости объекта [9]. Существующие

прототипы сред с отрицательной дисперсией в большинстве своём обладают высокими показателями потерь на рабочих частотах, данная проблема может быть решена благодаря параметрической компенсации при взаимодействии встречных волн [10].

Кроме этого фазовое согласование при взаимодействии встречных волн может быть обеспечено с использованием ряда других подходов и в других частотных диапазонах электромагнитных волн. Эти процессы также могут наблюдаться при взаимодействии волн любой природы: в процессе вынужденного комбинационного рассеяния [11], в случае вынужденного рассеяния Мандельштамма-Бриллюэна [1,4,12], взаимодействие встречных волн разного диапазона в условиях квазисинхронизма [6,13,14] (в среде с периодической модуляцией нелинейных характеристик), в лампе обратной волны. Таким образом, исследование данных процессов охватывает широкую область явлений.

Хотя основной характеристикой процессов параметрического взаимодействия является эффективность преобразования энергии, часто возникает необходимость контролировать форму и длительность импульса. В некоторых случаях эти требования входят в коллизию. Так с одной стороны взаимодействие встречных волн позволяет достигать аномально большого усиления по сравнению с обычным параметрическим взаимодействием, распространяющихся в одном направлении. С другой стороны в ряде работ было отмечено, что в случае взаимодействия встречных волн имеют место особенности переходных процессов изменения амплитуды выходного сигнала, которые способны вносить сильные искажения в работу импульсных устройств [5,15-17]. В настоящее время данные переходные процессы слабо изучены и являются предметом рассмотрения представленной диссертации. Сказанное выше в достаточной мере обосновывает **актуальность** проведённых исследований и их **практическую значимость**.

Цель диссертационной работы – Выявить особенности и закономерности переходных процессов при параметрическом взаимодействии встречных волн.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- численными методами исследовать основные характеристики переходных процессов при параметрическом взаимодействии встречных волн в режиме усиления и генерации в приближении заданного поля накачки (линейный режим);
- исследовать численно основные характеристики переходных процессов в режиме усиления с учётом истощения накачки (нелинейный режим);
- исследовать численно основные характеристики переходных процессов в импульсном режиме.

Научная новизна:

- впервые были выявлены закономерности переходных процессов при параметрическом взаимодействии встречных волн. В приближении заданной накачки (линейное приближение) получены аппроксимирующие зависимости для временного поведения амплитуды сигнала на выходе из среды и зависимость постоянной времени этого процесса от параметров усиления $a_{30}KL$;

- показано, что характер переходных процессов в линейной и нелинейной области значений параметров усиления $a_{30}KL$ принципиально отличается. При превышении границы линейного приближения ($a_{30}KL > \pi/2$) длительность переходного процесса сокращается, а сам процесс приобретает характер самовозбуждения.

- впервые показано, что максимум времени переходного процесса определяется значениями поглощения взаимодействующих волн в среде и соответствует границе линейного приближения для параметров усиления;

- нестационарная модель была впервые использована для интерпретации экспериментальных данных, полученных при параметрическом взаимодействии встречных волн в беззеркальном параметрическом генераторе. Показано, что замедление роста эффективности преобразования с ростом интенсивности накачки, наблюдаемое в эксперименте, обусловлено временной стохатизацией.

Практическая значимость и использование результатов работы.

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы при разработке новых параметрических устройств взаимодействия встречных волн, таких как миниатюрный параметрический усилитель света и беззеркальный генератор. А также при интерпретации ряда других явлений, в которых проявляются элементы параметрического взаимодействия встречных волн.

Достоверность полученных результатов обеспечена обоснованностью использованных в работе теоретических методик исследования, их совпадением, в предельных случаях с результатами работ других авторов и качественное согласие результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Научные положения, выносимые на защиту:

1) временное поведение амплитуды генерируемых при параметрическом взаимодействии встречных волн в линейном приближении аппроксимируется зависимостью: $a_2 = a_{20}(1 - e^{-t/\tau})$. Зависимость постоянной времени τ от параметров усиления $a_{30}KL$ аппроксимируется выражением: $\tau = \Delta t / \cos(a_{30}KL)$;

2) при взаимодействии встречных волн положение максимума времени переходного процесса и порога самовозбуждения в зависимости от параметров усиления $a_{30}KL$

соответствуют граничному значению линейного приближения, определяемому индексами потерь;

3) обнаруживаемая в нестационарной модели параметрического взаимодействия встречных волн стохатизация процесса прямого и обратного преобразования в неоднородном поле накачки – основная причина замедленного роста эффективности преобразования, наблюдаемого в эксперименте.

Личный вклад соискателя заключается в постановке, совместно с научным руководителем, цели и задач исследования; в моделировании процессов параметрического взаимодействия встречных волн; исследовании основных характеристик процесса; анализе и интерпретации данных; в подготовке научных статей и тезисов докладов, отражающих основные результаты исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе выполнения работы:

1) получена аппроксимация существенного временного поведения амплитуды сигнала на выходе из среды при включении взаимодействия встречных волн в приближении заданной накачки. Аппроксимация имеет вид типичный для линейных переходных процессов радиотехнике и позволяет определить постоянную времени процесса. Для постоянной времени получена аппроксимирующая зависимость в приближении заданной накачки от параметров усиления: длины среды, величины амплитуды накачки и коэффициента связи волн;

2) показано, что в нелинейной области значений параметров усиления, постоянная времени переходного процесса уменьшается с ростом значений параметров усиления, а переходной процесс изменения амплитуды сигнала на выходе из среды приобретает скачкообразный вид;

3) граница линейной области изменения параметров усиления изменяется в зависимости от потерь в среде. Её положение при наличии потерь на частотах генерируемых волн может быть точно определено из феноменологической формулы решения стационарной модели в приближении заданного поля. Увеличение потерь на частоте накачки, качественно приводит к сдвигу границы в область больших значений;

4) наличие фазового рассогласования в линейной области изменения параметров усиления не приводит к изменению времени переходного процесса. В нелинейной области постоянная времени растёт с ростом величины фазового рассогласования.

5) в линейной области изменения параметров усиления при взаимодействии встречных волн короткий импульс (с длительностью меньше постоянной времени переходного процесса) претерпевает сильные искажения: задняя часть импульса усиливается намного сильнее передней, позади импульса формируется длинный параметрический след;

6) режим самовозбуждения при взаимодействии встречных волн теоретически может быть достигнут при любом значении потерь в среде, при этом система возбуждается от любого сколь угодно малого затравочного импульса. Порог самовозбуждения соответствует границе линейной области изменения параметров усиления – он изменяется при наличии потерь аналогичным образом.

7) нестационарное рассмотрение взаимодействия с встречных волн позволяет получить результат адекватный эксперименту и качественно объяснить замедленный рост эффективности преобразования наблюдавшийся при параметрическом взаимодействии встречных волн в экспериментальной работе [6].

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Slabko V. V., Three-wave mixing of ordinary and backward electromagnetic waves: extraordinary transients in the nonlinear reflectivity and parametric amplification / V. V. Slabko, A. K. Popov, V. A. Tkachenko, S. A. Myslivets // Optics Letters. — 2016. — Vol. 41, no. 17. — P. 3976–3979.

2. Слабко В. В. Transient processes in the parametric interaction of counterpropagating waves / В. В. Слабко, А. К. Попов, С. А. Мысливец, Е. В. Рассказова, В. А. Ткаченко, А. К. Москалёв // Квантовая Электроника. – 2015. - 45(12). – с.1151–1152.

3. Tkachenko V.A., Extraordinary time-depended processes in the parametric interaction of counterpropagating waves / V.A. Tkachenko, A. S. Tsipotan, S. A. Myslivets, V.V. Slabko // Progress in electromagnetics Research Symposium 2017. – – Singapore : IEEE, 2018. — P. 17563866.

4. Slabko V.V., Extraordinary time-depended processes in the parametric interaction of counterpropagating waves / V.V. Slabko, A. K. Popov, S. A. Myslivets, V.A. Tkachenko // Laser Optics (LO), 2016 International Conference. — St. Petersburg : IEEE, 2016. — P. 16251717.

5. Popov A. K., Shaping Light in Backward-Wave Nonlinear Hyperbolic Metamaterials / A. K. Popov, S. A. Myslivets, V.V. Slabko, V. A. Tkachenko, T. F. George // Photonics. — 2018. — Vol. 5, no. 2(8).

6. Ткаченко В. А., Особенности переходных процессов при параметрическом взаимодействии встречных волн / В. А. Ткаченко, Е. В. Рассказова, А. К. Москалёв, В. В.

Слабко // Школа семинар фотоника нано и микро структур (ФНМС-2015): материалы. — Томск : Изд-во ТУСУРа, 2015.

7. Ткаченко В. А. Нестационарные процессы при параметрическом взаимодействии встречных волн // Сборник тезисов, материалы Двадцать второй Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ-22). — Ростов-на-Дону : издательство АСФ России, 2016. — С. 291.

8. Ткаченко В. А. Особенности переходных процессов при взаимодействии встречных волн с учётом истощения накачки // Материалы международной научно-практической конференции "Молодежь и наука: Проспект Свободный - 2016". — Красноярск: Библиотечно издательский комплекс Сибирского федерального университета, 2016. — С. 36–39.

9. Slabko V.V., Parametric amplification with backward waves: Pulse shapes / V.V. Slabko, A. K. Popov, S. A. Myslivets, V.A. Tkachenko // Technical digest of international conference ICONO/LAT 2016. — Minsk, 2016.

10. Popov A. K., Frequency mixing of guided electromagnetic waves in hyperbolic metamaterials / A. K. Popov, V.V. Slabko, V.A. Tkachenko, S. A. Myslivets, I. S. Nefedov // 50th international conference DAYS ON DIFFRACTION 2017 ABSTRACTS. — St. Peterburg, 2017. — P. 119.

11. Tkachenko V.A., Effects of Losses and Phase Mismatch on Transient Processes in Parametric Amplification through Three-wave Mixing of Ordinary and Backward Electromagnetic Waves / V.A. Tkachenko, A. S. Tsipotan, S. A.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bobroff D L. Coupled-Modes Analysis of the Phonon-Photon Parametric Backward-Wave Oscillator // Journal of Applied Physics. — 1965. — Vol. 36, no. 5. — P. 1760–1769.

2. Popov A. K., Negative-index metamaterials: second-harmonic generation, Manley–Rowe relations and parametric amplification / A. K. Popov, V. M. Shalaev // Applied Physics B. — 2006. — Vol. 84, no. 1. — P. 131.

3. Shalaev M. I., Negative group velocity and three-wave mixing in dielectric crystals / M. I. Shalaev, S. A. Myslivets, V. V. Slabko, V. M. Shalaev, A. K. Popov // Optics Letters. — 2011. — oct. — Vol. 36, no. 19. — P. 3861.

4. Harris S E. PROPOSED BACKWARD WAVE OSCILLATION IN THE INFRARED // Applied Physics Letters. — 1966. — Vol. 9, no. 3. — P. 114–116.

5. Воляк К. И., Исследование параметрического генератора с обратной волной. Радиотехника и электроника / К. И. Воляк, А. С. Горшков // Радиотехника и Электроника. — 1973. — Т. 18, № 10. — С. 2075.
6. Canalias C., Mirrorless optical parametric oscillator / C. Canalias, V. Pasiskevicius // Nature Photonics. — 2007. — aug. — Vol. 1. — P. 459.
7. Robert Boyd. Nonlinear Optics. — 2nd Edition. — Academic Press, 2002. — P. 576.
8. Shadrivov I. V., Second-harmonic generation in nonlinear left-handed metamaterials / Shadrivov I. V., Zharov A. A, Kivshar Y. S. // Journal of the Optical Society of America B. — 2006. — Vol. 23, no. 3. — P. 529–534.
9. Grbic A., Overcoming the Diffraction Limit with a Planar Left-Handed Transmission-Line Lens / A. Grbic, G. V. Eleftheriades // Physical Review Letters. — 2004. — Vol. 92, no. 11. — P. 117403.
10. Popov A. K, Compensating losses in negative-index metamaterials by optical parametric amplification / A. K. Popov, V. M. Shalaev // Optics Letters. — 2006. — Vol. 31, no. 14. — P. 2169–2171.
11. Popov A. K., Enhancing coherent nonlinear-optical processes in nonmagnetic backward-wave materials / A. K. Popov, M. I. Shalaev, S. A. Myslivets, V. V. Slabko, I. S. Nefedov // Applied Physics A. — 2012. — dec. — Vol. 109, no. 4. — P. 835–840.
12. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. — Москва : Наука, 1989.—С. 560.
13. Conti C., Cavityless oscillation through backward quasi-phase-matched second-harmonic generation / C. Conti, G. Assanto, S. Trillo // Optics Letters. — 1999. — Vol. 24, no. 16. — P. 1139–1141.
14. Minor C. E., Mirrorless optical parametric oscillation in bulk PPLN and PPLT: a feasibility study / C. E. Minor, R. S. Cudney // Applied Physics B. — 2017. — Vol. 123, no. 1. — P. 38.
15. Kaup D. J., Space-time evolution of nonlinear three-wave interactions. I. Interaction in a homogeneous medium / D. J. Kaup, A. Reiman, A. Bers // Rev. Mod. Phys. — 1979. — Vol. 51, no. 2. — P. 275–309.
16. Preobrazhensky V Explosive instability of quasi-phonon triads in antiferromagnet under frequency modulated electromagnetic field / V. Preobrazhensky, O. Yevstafyev, P. Pernod, V. Berzhansky // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2010. — Vol. 322, no. 6. — P. 585–588.
17. Preobrazhensky V., Supercritical dynamics of magnetoelastic wave triad in a solid / V. Preobrazhensky, O. Yevstafyev, P. Pernod, O. Bou Matar, V. Berzhansky // Physics of Wave Phenomena. — 2012. — Vol. 20, no. 4. — P. 256–263

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

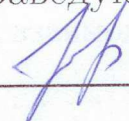
«Сибирский федеральный университет»

Институт инженерной физики и радиоэлектроники

Базовая кафедра фотоники и лазерных технологий

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой:

 Втюрин А.Н.

» 20 » июль 2018г.

НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (ДИССЕРТАЦИЯ)

Переходные процессы при параметрическом взаимодействии

встречных волн

Специальность

03.06.01 – Физика и астрономия

01.04.05 – Оптика

Научный руководитель  д. ф.-м. н., проф. Слабко В.В.

Аспирант  Ткаченко В.А.

Красноярск 2018 г.